

镁润湿调控 Al/SiC 复合材料界面与性能研究

张 昶

(佳木斯大学材料科学与工程学院, 黑龙江佳木斯 154000)

摘要: 基于熔体包裹法制备Al/Mg-SiC复合材料, 研究发现Mg含量对界面结构与力学性能具有显著调控作用。当Mg含量为15%时, 金相与SEM显示此时界面结合效果最优, SiC分散均匀, 三点弯曲强度达峰值206.9 MPa, 且腐蚀电流密度最低, 抗腐蚀能力最佳。低于10% Mg时, 颗粒裸露, 强度仅169.5 MPa; Mg \geq 20%时则诱发Al-Mg脆性相增加, 颗粒周围的微裂纹密度提升, 弯曲强度衰减30%。试验证明通过精准控制Mg包覆层厚度可抑制脆性相生成, 从而协同优化力学与耐蚀性能。确立12%~16%为Mg含量优化窗口, 为高性能复合材料设计提供机制指导。

关键词: 熔体包裹法; SiC颗粒; Al基复合材料; 界面调控; 力学性能; 腐蚀性能

铝及其合金因轻质, 高比强度及优异的耐腐蚀性, 在船舶和汽车等工业领域得到广泛应用^[1]。然而, 在海洋大气和工业酸性介质等恶劣环境中, 铝基材料易发生局部腐蚀(如点蚀和缝隙腐蚀), 导致结构失效风险显著增加^[2]。为提升铝基材料的综合性能, 研究者通过引入陶瓷增强相(如SiC颗粒)制备铝基复合材料(AMCs), 利用SiC的高硬度和低热膨胀系数及与铝基体相近的电化学电位, 降低微观电偶腐蚀倾向, 从而改善耐蚀性^[3-5]。

铝基复合材料的性能高度依赖于增强体与基体的界面结合质量。研究表明^[6-7], Al熔体与SiC颗粒的润湿性较差, 导致铸造过程中颗粒易团聚, 结合性差, 界面无法形成有效复合^[8]。这些缺陷不仅增加腐蚀介质渗透通道, 还成为力学载荷下的裂纹萌生源, 严重制约复合材料的工程应用^[9]。

研究者提出了多种界面改性策略^[10-11], 包括颗粒表面涂层(如SiO₂、Ni)和基体合金化(添加Mg和Cu)等^[12]。其中, Mg元素因其独特的物理化学特性备受关注, Mg可通过降低Al/SiC界面能改善润湿性^[13]。但现有研究多聚焦于基体Mg合金化^[14], 而对Mg包覆SiC颗粒的界面调控机制及其对复合材料组织-性能的协同影响缺乏系统研究。

本研究提出一种创新性界面设计方法: 通过熔融Mg预包覆SiC颗粒, 构建“Al/Mg-SiC”复合界面结构。旨在实现以下目标: ①利用Mg的润湿作用促进SiC在Al熔体中的均匀分散; ②探究Mg包覆量对复合材料弯曲强度和耐腐蚀性的影响。

1 试验材料与方法

本研究原材料选用纯Al、纯Mg和尺寸为150 μ m的SiC颗粒。试验设计四组不同Mg-SiC含量, 相应参数如表1所示。

SiC颗粒经5% HF酸洗10 min去除表面氧化物, 随后在120 $^{\circ}$ C真空干燥2 h。在Ar气保护情况下, 分别将一定量的纯Al和纯Mg加热至720 $^{\circ}$ C。纯Mg呈现熔融态后保温5 min, 将一定量的SiC颗粒加入至Mg液中, 并进行搅拌, 直至Mg液充分包裹SiC颗

作者简介:

张昶(2005-), 男, 本科, 主要研究方向为金属基复合材料。电话: 16604668388, E-mail: mincai835464022@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1243-08

收稿日期:

2025-04-10 收到初稿,

2025-06-10 收到修订稿。

表1 试验组成成分含量
Tab.1 Experimental component content

组别	Al	Mg	SiC	Al : Mg : SiC	$w_B / \%$
I	60	10	30	6 : 1 : 3	
II	55	15	30	11 : 3 : 6	
III	50	20	30	5 : 2 : 3	
IV	45	25	30	9 : 5 : 6	

粒。将Mg液包裹的SiC颗粒迅速添加至熔融态的Al液中，再次进行搅拌，使得被Mg液包裹的SiC颗粒均匀分散在Al液中，保温5 min中后将其倒入石墨模具中，空冷至室温，制成Al/Mg-SiC复合材料，制备流程如图1所示。

使用金相切割机对铸件进行切割制样，使用XRD、SEM和EDS进行Al基复合材料物相分析，使用万能力学试验机和电化学工作站对Al基复合材料进行

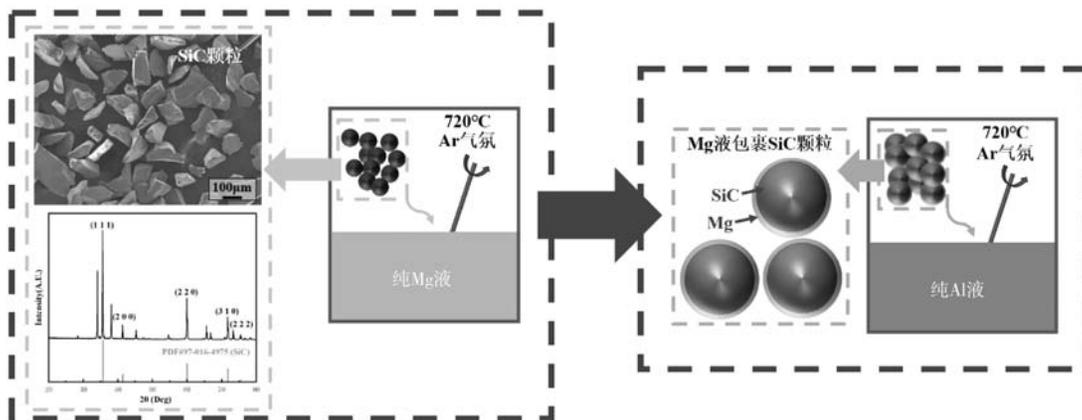


图1 制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart

性能检测。弯曲强度示意图和电化学腐蚀试样参数如图2所示。

通过三点弯曲试验多次测量试样的弯曲性能，包括弯曲强度和弯曲模量，其中弯曲强度的计算公式如式(1)所示：

$$\sigma_f = \frac{3F_{\max}S}{2bh} \quad (1)$$

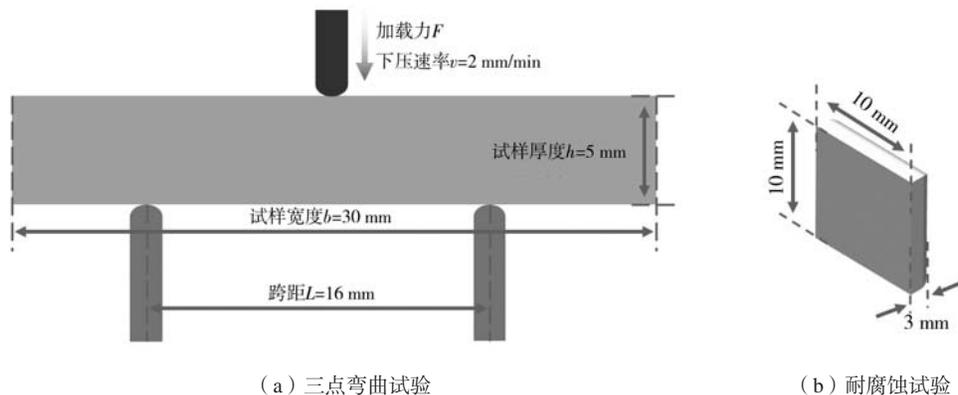
式中： F_{\max} 为试样断裂时的最大载荷，N； S 为跨距，mm； b 为试样宽度，mm； h 为试样厚度，mm。

弯曲模量如式(2)所示：

$$E_b = \frac{S^3}{4bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (2)$$

式中： S 为跨距，mm； b 为试样宽度，mm； h 为试样厚度，mm； $\Delta F / \Delta \delta$ 为弹性段斜率，N/mm。

电化学腐蚀试验采用3.5%的NaCl溶液，使用去离子水和分析纯NaCl进行配制，使用参比电极和铂片电极，腐蚀时间为30 min，得出腐蚀电流密度曲线，通过外推法进行腐蚀性能评估。



(a) 三点弯曲试验

(b) 耐腐蚀试验

图2 性能检测相关数值

Fig. 2 Performance testing related values

2 检测及分析

2.1 显微组织分析

对复合材料进行XRD检测分析，SiC颗粒分散在Al合金基体中，复合材料除了Al基体外，还有Al-Mg化合物（ Al_3Mg_2 和 $Al_{12}Mg_{17}$ ），如图3所示。

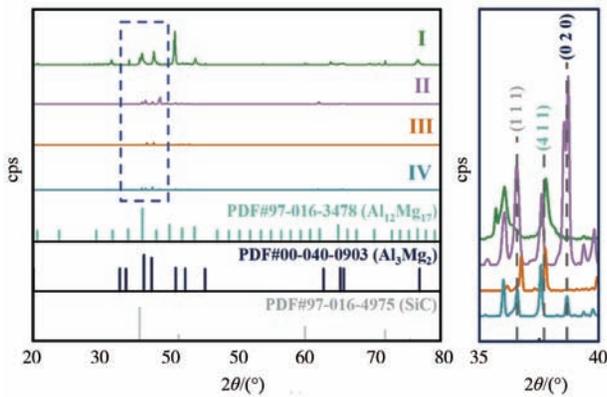


图3 不同组别的Al/Mg-SiC铸件XRD图
Fig. 3 XRD patterns of Al/Mg-SiC castings in different groups

金相图（图4）直观呈现镁包覆层状态对SiC分散性的影响。I组（10% Mg）中，SiC颗粒边缘存在脱落坑，源于Mg包覆不连续导致的弱结合。II组（15% Mg）则呈现均匀的“核-壳”结构，SiC颗粒被完整Mg层包裹。但过量镁引发显著恶化：III组（20% Mg）和IV组（25% Mg）出现颗粒反应区域。

不同制备参数的Al基复合材料的显微组织表征如图5所示，使用扫描电子显微镜（SEM）及能谱分析（EDS）进行检测。I组SiC颗粒呈现局部团聚现象，且颗粒表面存在明显裸露区域，表明Mg包覆层不足。II组的显微组织显著优化，SiC颗粒均匀分布于Al基体，且颗粒表面形成连续包覆层，高倍SEM显示Al/SiC界面平直。III组与IV组则出现包覆层过厚引发的负面效应，SEM显示SiC颗粒表面Mg层局部破裂，当Mg层过厚时，在复合材料制备过程中，Mg与Al基体的接触面积和反应点位显著增加，Al和Mg之间发生过度的合金化或化学反应^[15]，形成不均匀的反应层（主要成分为Al-Mg金属间化合物，如 $\beta-Al_3Mg_2$ 和 $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$

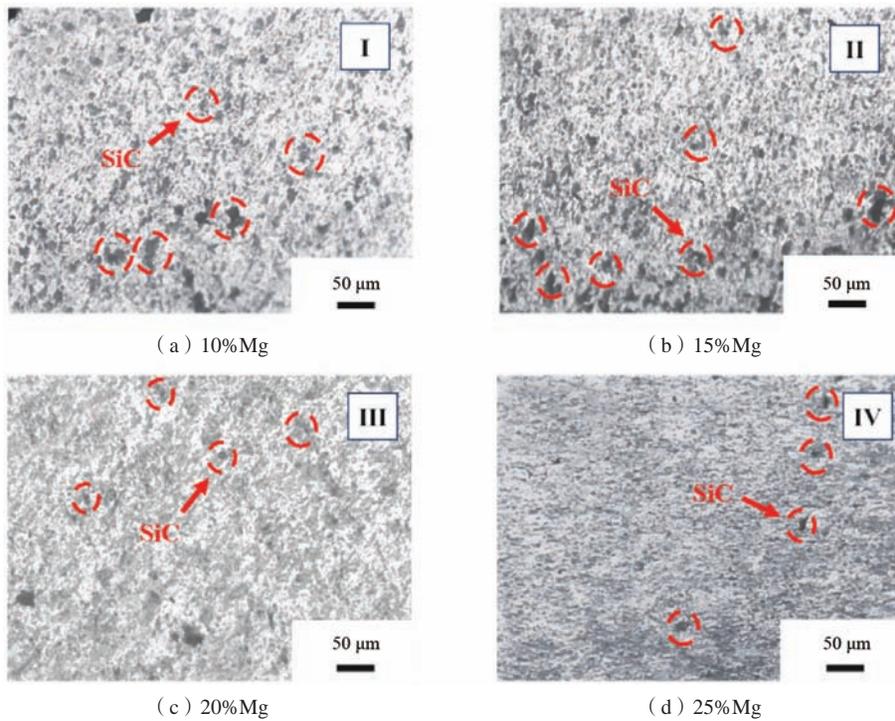


图4 不同组别的Al/Mg-SiC铸件的金相图
Fig. 4 Metallographic diagrams of Al/Mg-SiC castings in different groups

等)。反应方程式如式（3）和式（4）所示。。



2.2 性能分析

2.2.1 弯曲性能分析

试验通过三点弯曲试验评估了不同组别复合材料的力学性能，如图6所示。结果表明，Mg包覆层对弯曲

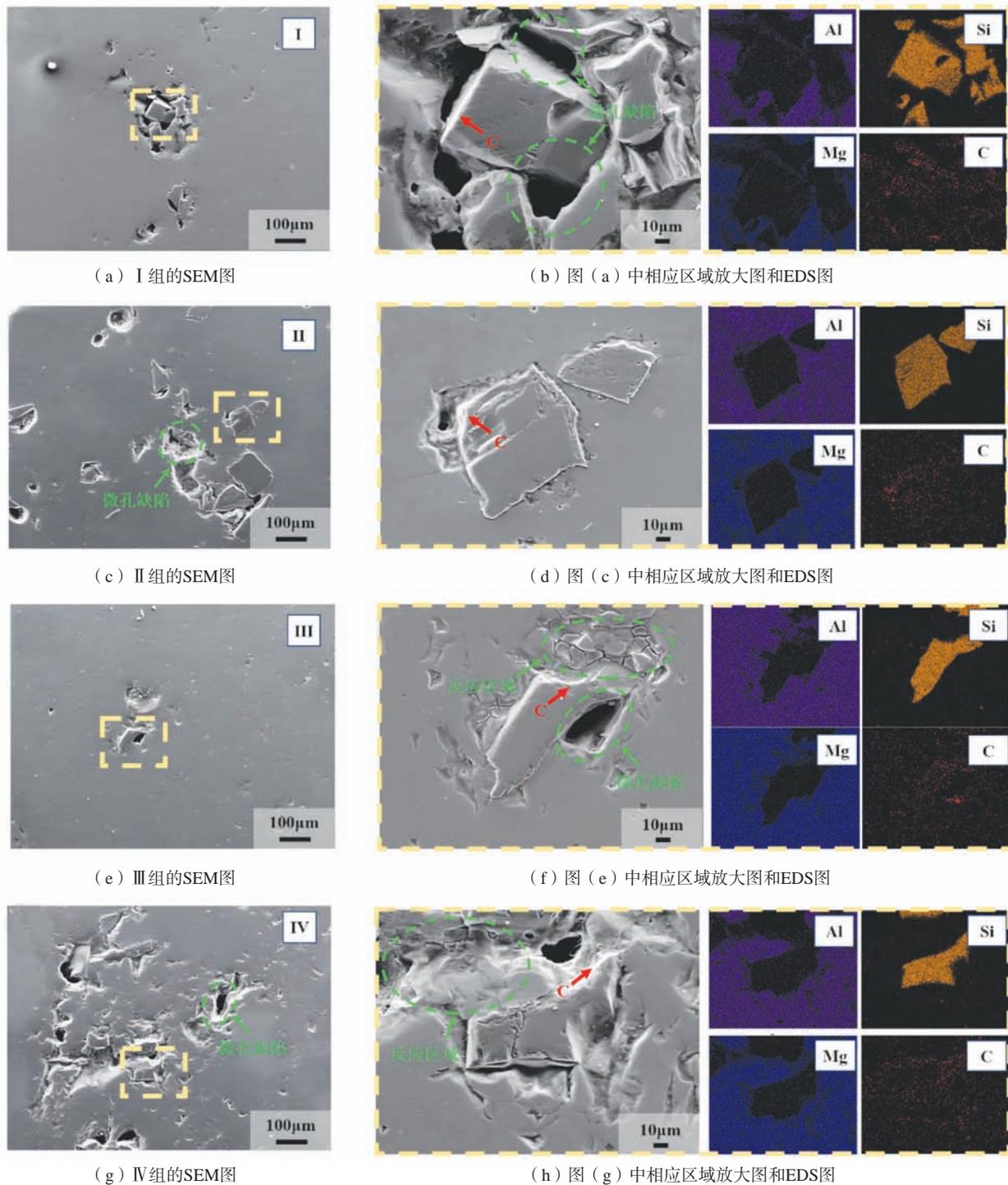


图5 不同组别的Al/Mg-SiC铸件的SEM图和EDS图

Fig. 5 SEM and EDS images of different groups of Al/Mg-SiC castings

强度具有显著调控作用，其强度变化规律与显微组织演变及界面结合状态有密切联系。

基于弯曲强度与断口形貌的试验数据，揭示了Mg包覆层对Al/SiC复合材料力学性能的核心调控机制。当Mg含量为10%（I组）时，弯曲强度仅169.5 MPa，断口呈现大面积平整解理面。如图7（a）所示，结合显

微组织分析，如图5（a）和（b）所示，表明SiC颗粒表面存在裸露区域，导致Al基体与SiC界面结合薄弱，此时裂纹沿弱界面快速扩展。Mg含量增至15%（II组）时，弯曲强度显著提升至206.9 MPa峰值，断口出现撕裂棱与韧窝，如图7（b）所示。该现象源于镁包覆层形成连续界面，使载荷有效传递至SiC颗粒，迫使

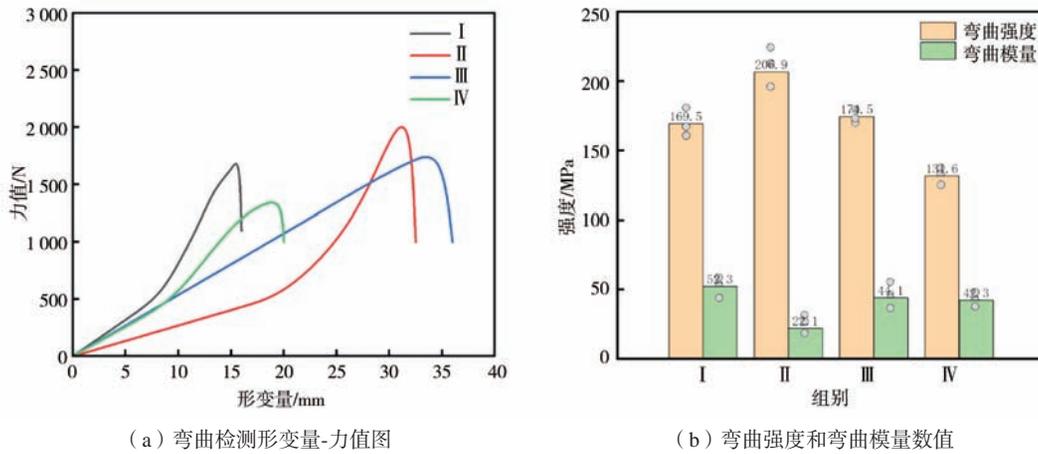


图6 Al/SiC复合材料的弯曲强度
Fig. 6 Bending Strength of Al/SiC Composites

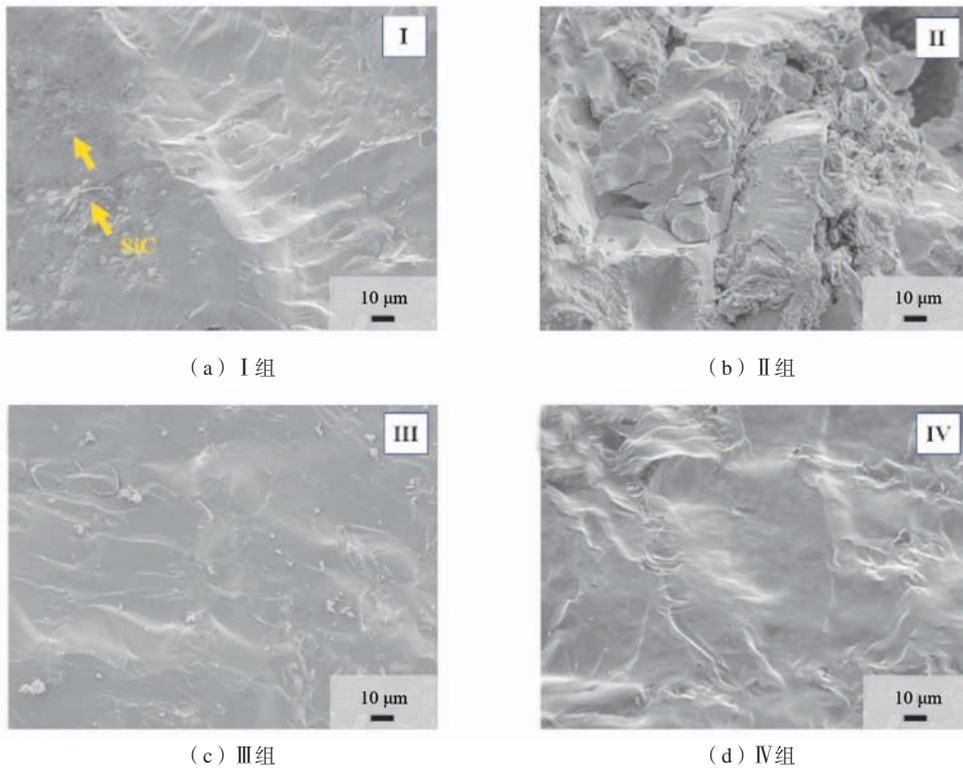


图7 各组别材料的断口SEM图
Fig. 7 Fracture SEM images of each group of materials

裂纹转向基体内部扩展，提升断裂能耗。

过量镁则引发脆性相主导的失效模式。镁含量为20%~25% (III和IV组)时，弯曲强度较II组下降18%~30%。XRD (图3) 检测出Mg-Al金属间化合物，断口特征如图7 (c) 和 (d) 所示，表现为沿Al-Mg相界面的沿晶断裂，符合脆性相特性^[16]。

2.2.2 耐腐蚀性分析

通过动电位极化曲线与电化学阻抗谱 (EIS) 测

试，系统研究了Mg包覆层对Al基复合材料耐腐蚀性能的影响规律，如图8所示。试验结果表明，II组的腐蚀电流密度 (i_{corr}) 最低，其耐蚀性最优。

在Al/SiC复合材料中，Mg含量较少时 (I组)，因包覆不完整，出现深而密集的点蚀坑，界面缺陷加剧了Cl⁻的渗透，导致局部腐蚀加速。如图8所示，过量的Mg含量 (III组与IV组) 引发多相腐蚀效应，极化曲线显示其自腐蚀电位显著负移，且存在多个阳极溶解峰，Al-Mg共晶相的优先溶解，导致阻抗值急剧下降^[17]。

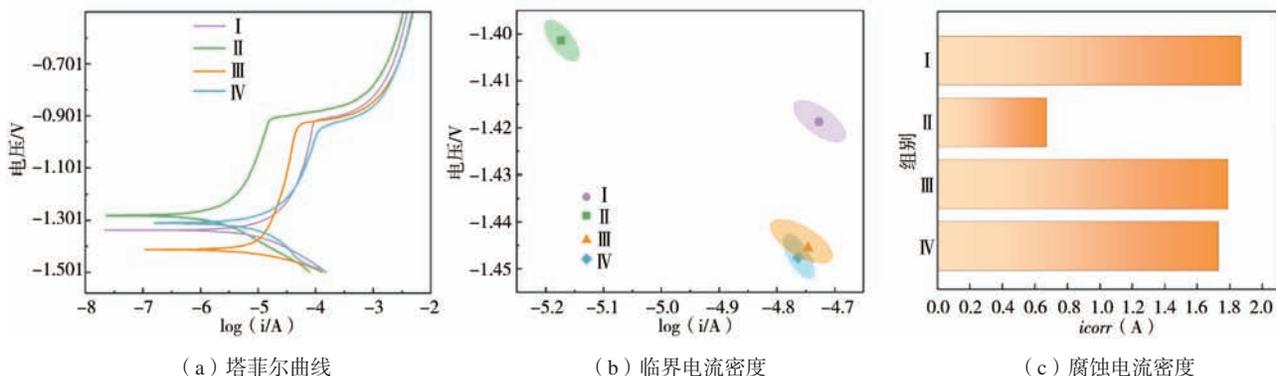
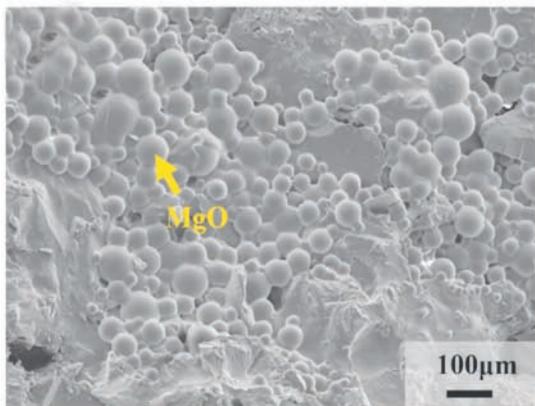


图8 耐腐蚀性分析
Fig. 8 Corrosion resistance analysis

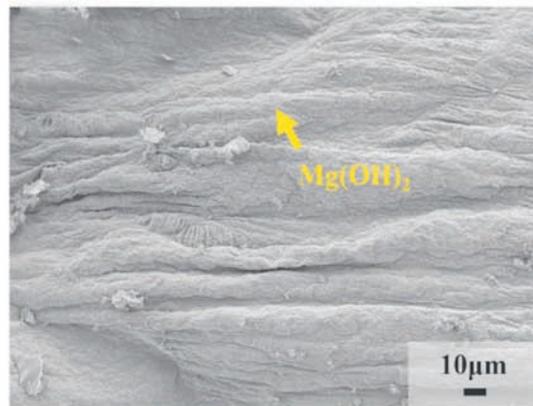
Mg在腐蚀过程中优先氧化并与水反应生成MgO和Mg(OH)₂,如图9所示,MgO呈现致密连续颗粒状的结构,Mg(OH)₂因氢键作用易形成多孔层状形态。

Mg包覆层的界面保护效应主要分为两种作用机

制。首先,Tafel斜率下降,说明Mg层有效阻断Cl⁻扩散通道,延缓基体Al的活性溶解。其次,Mg在腐蚀介质中优先氧化生成MgO/Mg(OH)₂钝化膜,其高阻抗特性抑制电化学腐蚀进程^[18]。



(a) MgO区域



(b) Mg(OH)₂区域

图9 腐蚀区域的SEM图

Fig. 9 SEM diagram of corrosion region

3 分析及讨论

3.1 润湿性分析

基于Young润湿方程与界面能理论^[19],建立Al/SiC界面润湿性的热力学模型。假设熔融Al液滴在SiC表面的润湿行为受界面能(γ)主导,其接触角 θ 满足:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{\text{SiC}} - \gamma_{\text{Al}}}{\gamma_{\text{Al/SiC}}} \quad (5)$$

式中: γ_{SiC} 和 γ_{Al} 分别为 γ_{SiC} 与 γ_{Al} 表面能, $\gamma_{\text{Al/SiC}}$ 为Al/SiC界面能。引入Mg包覆层后,界面能修正为:

$$\gamma_{\text{Al/SiC-Mg}} = \gamma_{\text{Al/Mg}} + \gamma_{\text{Al/Mg}} - \Delta G \quad (6)$$

式中: ΔG 为Mg与SiC的化学相互作用能。Mg包覆后,由于界面反应的介入,界面能显著降低,即 $\gamma_{\text{Al/SiC-Mg}} < \gamma_{\text{Al/SiC}}$,接触角 θ 减小,有效改善Al基体与SiC颗粒的界面润

湿性。

3.2 微电池效应

微电池效应指的是由于材料中存在不同电化学电位的区域,形成微小的原电池,导致局部腐蚀。如图10所示,在金属材料的腐蚀中,Al基体和SiC颗粒之间的电位差可能形成这样的微电池,加速腐蚀^[20]。

Al和Mg的电位显著负于SiC,形成微电池(Al和Mg为阳极,SiC为阴极)。阳极反应以Al基体溶解和Mg包覆层溶解为主,Al基体发生点蚀,而Mg点位负值更大,成为牺牲阳极,优先溶解,释放的电子抑制Al的阳极溶解(阴极保护),延缓Al基体腐蚀,这与试验结果腐蚀电流密度降低复合。阴极反应发生在SiC表

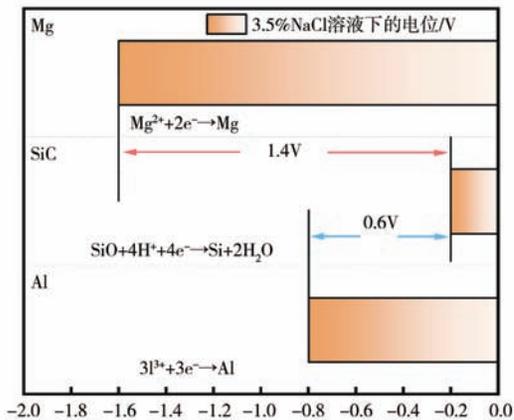
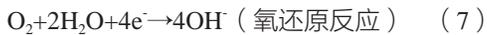
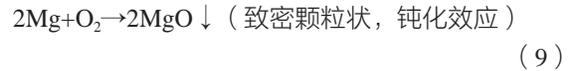
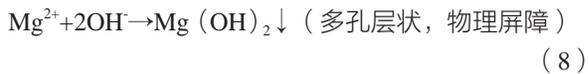


图10 Al、Mg和SiC的电极电位
Fig. 10 The electrode potentials of Al, Mg and SiC

面，发生氧化还原反应，如式（7）所示。



由于Mg优先牺牲腐蚀，产物主要以Mg(OH)₂和MgO为主，腐蚀产物生成反应方程如下所示：



Mg包覆层通过牺牲阳极反应优先消耗，生成的MgO致密层阻断Cl⁻扩散，而多孔Mg(OH)₂则需依靠层状堆积堵塞通道。

4 结论

(1) Mg包覆层通过改善Al熔体对SiC颗粒的润湿性，显著提高了Al基体与SiC颗粒之间的结合能力，同时，显著提升SiC在基体中的分散均匀性。当Al:Mg:SiC=11:3:6时，复合材料弯曲强度达峰值6.56 MPa，载荷通过Mg层传递至SiC颗粒。

(2) Mg包覆层通过牺牲阳极、物理屏障作用和化学钝化作用，增加材料的耐腐蚀性能。Mg优先腐蚀形成MgO/Mg(OH)₂钝化膜，抑制Al的腐蚀。当Al:Mg:SiC=11:3:6时，复合材料耐腐蚀性能最优。

(3) 过量的Mg使结合界面处形成Al₃Mg₂等脆性化合物和Mg₂Si析出相，引发复合材料脆性断裂，同时，复合界面多相电偶腐蚀，加速局部溶解，导致复合材料耐腐蚀性能下降。

参考文献:

- [1] 王海涛, 林晨, 樊子民, 等. SiC含量对Al基复合材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(6): 2256-2261.
- [2] 张冉, 朱士泽, 刘振宇, 等. 时效温度对SiC/Al-Zn-Mg-Cu复合材料时效析出行为的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(8): 1043-1054.
- [3] 谷黎明, 冯效铭, 于朝, 等. 深冷循环对SiC/Al复合材料宏微观残余应力的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(8): 1031-1042.
- [4] 李连驰, 马小军, 刘海滨, 等. Mg含量对汽车底盘副车架用AlSi₁₀Mg铸造铝合金组织及性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74(4): 494-499.
- [5] 李龙, 余申卫, 王成辉, 等. 双尺度SiC_p增强Al基复合材料的制备及耐磨性研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(5): 153-158.
- [6] 崔岩, 廖家杰, 曹雷刚, 等. 中高体积分SiC_p/Al复合材料的力学性能及强化机制[J]. 材料工程, 2024, 52(4): 110-119.
- [7] 薛鹏鹏, 邓坤坤, 聂凯波, 等. SiC_p分布对SiC_p/2024Al复合材料组织和性能及变形行为的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(4): 164-175.
- [8] 苏幡, 王爱琴, 谢敬佩, 等. SiC_p/Al-Si基复合材料界面结构调控及强化机制的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2): 1-12.
- [9] 韩杨, 相志磊, 陈子勇. Si含量对Al-Si-Cu-Ni-Mg合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2024, 73(6): 779-787.
- [10] 吕书林, 郭文波, 陈露, 等. 颗粒增强铝基复合材料的制备方法及其热处理研究[J]. 铸造, 2024, 73(6): 727-737.
- [11] 丁雪萍, 张祺, 周峻莹, 等. SLM成形AlSi10Mg合金及SiC/AlSi10Mg复合材料的耐蚀和耐磨性能[J]. 材料工程, 2024, 52(10): 97-105.
- [12] MA G, ZHU S, WANG D, et al. Effect of heat treatment on the microstructure, mechanical properties and fracture behaviors of ultra-high-strength SiC/Al-Zn-Mg-Cu composites[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(10): 2233-2243.
- [13] 牛楚涵. SiC_n/Mg互穿材料表面微弧氧化/自组装复合涂层的制备与性能研究[D]. 佳木斯: 佳木斯大学, 2024.
- [14] LIU Y, JIA L, WANG W, et al. Effect of Ni content on the wear behavior of Al-Si-Cu-Mg-Ni/SiC particles composites[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(2): 374-383.

- [15] 马宗义. 原位生长陶瓷相增强Al基复合材料的界面微观结构及性能 [J]. 材料工程, 1994, (9): 61-62.
- [16] 刘琛, 朱永长, 叶丹, 等. Mg/Al复合材料制备工艺的研究与展望 [J]. 广东化工, 2023, 50(18): 75-76.
- [17] 郑凇, 张铭洋, 熊凌达, 等. SiC_p/Al复合材料焊接综述 [J]. 精密成形工程, 2024, 16(3): 32-43.
- [18] 郑磊. Mg对C/C-ZrC-SiC复合材料的组织结构及其烧蚀性能影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [19] 白淑英, 王冲, 郭恩宇, 等. SiC_p/Mg-6Zn-3Al复合材料力学行为有限元建模研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12): 1620-1627.
- [20] 刘健, 赵宇, 王武孝, 等. TiB₂/Mg-4Al-xSi镁基复合材料的耐磨性能研究 [J]. 铸造, 2024, 73(11): 1548-1553.

Study on the Interface and Properties of Al/SiC Composites Regulated by Mg Element Wetting

ZHANG Chang

(College of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154000, Heilongjiang, China)

Abstract:

Al/Mg-SiC composites were prepared via melt wrapping method. It was found that Mg content had a significant effect on the interface structure and mechanical properties. When the Mg content was 15%, metallographic observations and SEM images showed that the interface bonding effect was the best, the SiC was uniformly dispersed, the three-point bending strength reached the peak value of 206.9 MPa, and the corrosion current density was the lowest, and thus the corrosion resistance was optimal. When the Mg content was lower than 10%, the particles were bare and the strength was only 169.5 MPa. When Mg \geq 20%, the brittle phase of Al-Mg increased, the density of microcracks around the particles increased, and the bending strength decreased by 30%. Experiments showed that the formation of the brittle phase could be inhibited by precisely controlling the thickness of Mg coating layer, so as to synergistically optimize the mechanical properties and corrosion resistance. The range of 12%-16% was determined as the Mg content optimization window. This study would provide mechanism guidance for the design of high-performance composite materials.

Key words:

melt wrapping method; SiC particles; Al matrix composites; interface control; mechanical properties; corrosion performance